

## DINAMIČKO RUTIRANJE I DODELA TALASNIH DUŽINA U OPTIČKIM MREŽAMA ZASNOVANO NA UČENJU IZ PRIMERA

Dušan Teodorović, Jovan Popović, Katarina Vukadinović, Goran Marković  
Saobraćajni fakultet u Beogradu

**Sadržaj:** U radu je predložen “inteligentni” sistem za izbor ruta i dodelu talasnih dužina u optičkim mrežama u realnom vremenu. Za svaki ispostavljeni zahtev za korišćenjem resursa optičke mreže predloženi sistem donosi u realnom vremenu sledeće dve odluke: (a) odluku o prihvatanju ili odbijanju ispostavljenog zahteva; (b) odluku o ruti i talasnoj dužini u slučaju da je zahtev prihvaćen. Predloženi model je zasnovan na kombinaciji optimizacionih/heurističkih algoritama i veštačkih neuronskih mreža.

**Ključne reči:** Dinamička raspodela ruta i talasnih dužina, Metaheuristički algoritmi, Veštačke neuronske mreže

### 1. Uvod

Problem rutiranja i dodele talasnih dužina putevima svetlosti u optičkim *WDM* (*Wavelength Division Multiplexing*) mrežama, predstavlja jedan od suštinski važnih i izazovnih problema koji treba rešavati u cilju postizanja zahtevanih performansi u mreži. Put svetlosti između dva krajnja čvora mreže predstavlja potpuno optički komunikacioni kanal kojim se može ostvariti prenos signala brzinama i do nekoliko Gb/s, što je limitirano isključivo procesorskim mogućnostima korišćene terminalne opreme u krajnjim čvorovima mreže. Da bi se zahtevani putevi svetlosti u mreži uspostavili, svakom od njih neophodno je jednoznačno: 1) izabrati rutu i 2) dodeliti odgovarajuću talasnu dužinu. Ovaj problem se u literaturi sreće pod nazivom *routing and wavelength assignment (RWA)*. Pri rešavanju *RWA* problema, dva osnovna ograničenja koja moraju biti zadovoljena podrazumevaju: 1) ograničenje kontinuiteta talasne dužine i 2) ograničenje različitosti (kolizije) talasnih dužina. Pod ograničenjem kontinuiteta talasne dužine podrazumeva se da put svetlosti na svim linkovima duž izabranog puta od izvornog do odredišnog čvora mora koristiti istu talasnu dužinu. Ovo ograničenje je neophodno zadovoljiti kada se u optičkoj mreži ne koriste konvertori talasnih dužina, što

često mora biti ispunjeno zbog tehnoloških i ekonomskih razloga. Drugo navedeno ograničenje odnosi se na to da dva puta svetlosti koja koriste bar jedan zajednički fizički link moraju imati različite dodeljene talasne dužine.

Prema scenariju saobraćaja, RWA problemi se mogu generalno podeliti na dve opšte kategorije: *statičke* i *dinamičke*. Kod *statičkih* RWA problema, skup saobraćajnih zahteva između svih parova čvorova *a priori* je poznat, odnosno fiksiran u vremenu, sa mogućnostima redih promena nakon nekoliko časova, dana ili meseci, u skladu sa neznatnim mogućim varijacijama saobraćaja tokom vremena. Rešavanje *RWA* problema u ovom slučaju uobičajeno se svodi na rešavanje optimizacionog problema kojim se minimizira ili maksimizira izabrana kriterijumska funkcija, pri datom skupu ograničenja. Sa druge strane, u slučaju dinamičkog saobraćajnog scenarija, zahtevi za uspostavljanjem puteva svetlosti pojavljuju se jedan za drugim na potpuno slučajan način tokom vremena i imaju slučajno vremensko trajanje. Dinamički RWA problemi se moraju rešavati u realnom vremenu, u trenutku nastanka zahteva. Pri tome, osnovni cilj je da se maksimizira broj uspostavljenih puteva svetlosti u mreži (ili ekvivalentno, minimizira broj blokiranih zahteva) tokom određenog perioda vremena. U ovom radu razmatraju se dinamički RWA problemi.

Dinamičkim scenarijom saobraćaja modeliraju se različite situacije u transportnim mrežama. Mogući razlozi za često ukidanje postojećih i uspostavljanje novih puteva svetlosti mogu biti posledica značajnih promena vrednosti saobraćaja između krajnjih čvorova u mreži ili otkaza pojedinih komponenta u mreži (linkova ili čvorova). Za razliku od RWA problema u slučaju statičkog saobraćajnog scenarija, dobijanje RWA rešenja u slučaju dinamičkog scenarija mora biti računarski jednostavno ostvarljivo, s obzirom da se u ovom slučaju zahteva "on-line" donošenje odluka. Problem dinamičkog rutiranja i dodele talasnih dužina opsežno je istraživanih poslednjih godina. Različiti predloženi pristupi i algoritama za rešavanje ovog problema mogu se naći u [1] - [14].

U ovom radu se predlaže "inteligentni" sistem za izbor ruta i dodelu talasnih dužina putevima svetlosti u optičkim mrežama u realnom vremenu. Predloženi model je zasnovan na kombinaciji metaheurističkih algoritama i veštačkih neuronskih mreža. Preliminarna istraživanja ukazuju da je moguće razviti sistem za dodelu ruta i talasnih dužina putevima svetlosti, sposoban da generiše rešenja visokog kvaliteta u realnom vremenu.

Rad je organizovan na sledeći način. Postavka razmatranog problema je data u sekciji 2. U sekciji 3 je izložena osnovna ideja dinamičke raspodele ruta i talasnih dužina zasnovane na učenju iz primera. Zaključna razmatranja i pravci daljih istraživanja su dati u sekciji 4.

## 2. Postavka problema

Posmatra se optička WDM mreža u slučaju dinamičkog scenarija saobraćaja. Podrazumeva se da su fizička topologija i raspoloživi resursi mreže (broj optičkih predajnika i prijemnika u čvorovima i broj raspoloživih talasnih dužina na linkovima) poznati. Zahtevi za korišćenjem resursa optičke mreže su okarakterisani izvornim i određivim čvorem. Ovi zahtevi se ispostavljaju u slučajnim momentima vremena.

Drugim rečima, interval vremena između nailaska pojedinih zahteva za korišćenjem optičke mreže predstavlja slučajnu promenljivu. Svaki zahtev je takođe okarakterisan dužinom trajanja. Dužina trajanja, takođe predstavlja slučajnu promenljivu. Za svaki generisani zahtev neophodno je u realnom vremenu doneti odluku o prihvatanju ili odbijanju zahteva. Takođe, u slučaju da je zahtev prihvaćen neophodno je doneti odluku o izabranoj ruti i dodeljenoj talasnoj dužini svakom pojedinačnom putu svetlosti.

Čak i u slučaju jednostavnijeg, statičkog saobraćajnog scenarija, kada su svi zahtevi u mreži unapred potpuno poznati, pokazuje se da RWA problem predstavlja NP težak problem [1]. Kompleksnost i neophodnost rešavanja problema u realnom vremenu neminovno zahtevaju primenu heurističkih metoda pri rešavanju dinamičkog RWA problema. Uobičajeni pristup za rešavanje ovog problema je razdvajanje na dva odvojena potproblema: potproblem izbora rute (*dynamical routing*) i potproblem dodele talasne dužine (*dynamical wavelength assignment*) na izabranoj ruti [1].

Dinamičko rutiranje podrazumeva da se ruta za put svetlosti od izvornog do odredišnog čvora određuje u trenutku kada dva krajnja čvora ispostave zahtev da komuniciraju. Za rešavanje potproblema rutiranja predloženo je nekoliko algoritama dinamičkog rutiranja. Mogući pristupi za rešavanje potproblema rutiranja mogu se podeliti na fiksne i adaptivne algoritme, kao i na algoritme koji koriste globalne ili lokalne informacije o stanju u mreži [2]. *Fiksno* rutiranje (*FR*) je metod statičkog rutiranja, kod kojeg se svakom paru čvorova u mreži unapred odredi jedna ista ruta koja će biti uvek birana kada treba uspostaviti put svetlosti između posmatranih krajnjih čvorova. Ova ruta se uobičajeno određuje kao najkraći put između posmatranog para čvorova. Kod *adaptivnih* algoritama, svakom linku u mreži može se dodeliti cena koja reprezentuje stepen zauzetosti posmatranog linka (broj trenutno aktivnih puteva svetlosti preko linka). Pokazuje se da se primenom adaptivnog rutiranja može povećati verovatnoća prihvatanja zahteva. U slučaju kada su dostupne globalne informacije, odluke o rutiranju mogu se donositi na osnovu informacija o raspoloživosti talasnih dužina na pojedinim linkovima u mreži. Dodelom male vrednosti cene najmanje opterećenim linkovima, rute koje na svojim linkovima imaju veći broj slobodnih talasnih dužina će izbiti na vrh liste potencijalnih puteva. Suprotno, rute koje su više opterećene postaju »skuplje« i padaju na dno liste potencijalnih ruta.

Za rešavanje potproblema dodele talasnih dužina, predloženi su brojni heuristički pristupi. Detaljan pregled različitih istraživanih algoritama može se naći u [4].

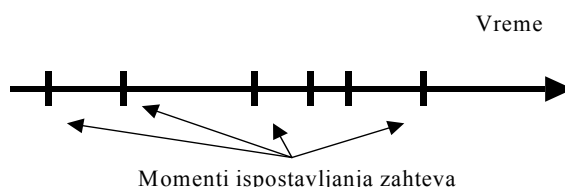
### **3. Dinamička raspodela ruta i talasnih dužina zasnovana na učenju iz primera: osnovna ideja**

Ovaj rad je zasnovan na ideji da je moguće razviti “inteligentni” sistem za dodelu ruta i talasnih dužina u optičkim mrežama sposoban da donosi odluke visokog kvaliteta u realnom vremenu. Sistem treba da bude u stanju da *prepozna* različite saobraćajne situacije u mreži i da donose odgovarajuće upravljačke odluke u realnom vremenu bez poznavanja funkcionalnih relacija između pojedinih promenljivih bitnih za proces upravljanja. Takođe, predloženi sistem treba da bude u stanju da *generalizuje*, da se *prilagodjava* i da *uči* na osnovu novih informacija i novog znanja. Osnovni koncept predloženog sistema može da bude primenjen prilikom rešavanja velikog broja različitih

inženjerskih i organizacionih problema okarakterisanih neizvesnošću i potrebom da se upravljanje vrši u realnom vremenu.

Predloženi inteligentni sistem za dinamičku raspodelu saobraćaja sačinjavaju sledeće komponente: (a) Skup saobraćajnih situacija; (b) Skup optimalnih odluka za generisane saobraćajne situacije; (c) Procedura za kreiranje inteligentnog sistema; (d) Procedura za testiranje razvijenog sistema

Skup saobraćajnih situacija se sastoji od velikog broja različitih saobraćajnih situacija. Interval vremena između ispostavljanja pojedinih zahteva za korišćenjem optičke mreže predstavlja slučajnu promenljivu. Simuliranjem vrednosti intervala vremena između ispostavljanja pojedinih zahteva (slika 1) i vrednosti trajanja pojedinih zahteva generiše se određena saobraćajna situacija.

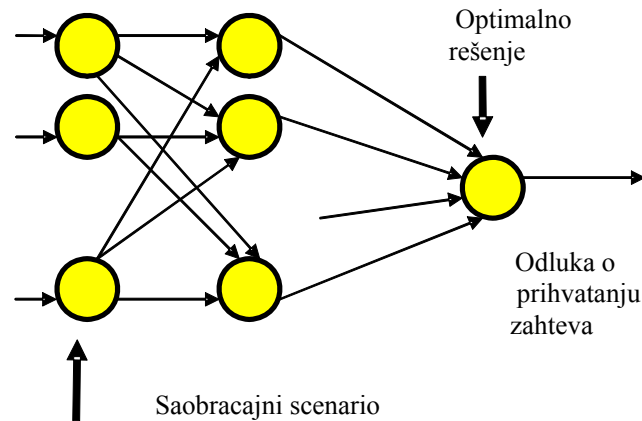


Slika 1 - Momenti ispostavljanja zahteva za korišćenjem optičke mreže

Dodelu ruta i talasnih dužina u optičkim mrežama želimo da izvršimo tako da maksimiziramo broj uspostavljenih konekcija u mreži. Različiti optimizacioni i/ili heuristički pristupi mogu da budu korišćeni za iznalaženje optimalnog ili rešenja bliskog optimalnom. Za svaki od generisanih saobraćajnih scenarija primenom izabranog optimizacionog ili heurističkog algoritma vrši se dodela ruta i talasnih dužina. Na ovaj način se generiše skup optimalnih odluka za generisane saobraćajne situacije.

Veštačke neuronske mreže mogu da uče iz iskustva, da vrše generalizaciju i da uoče ključne karakteristike u ulaznim podacima. Poznato je da veštačke neuronske mreže predstavljaju *univerzalne aproksimatore*. Pokazano je da višeslojne neuronske mreže sa signalom koji se prostire unapred i sa jednim skrivenim slojem mogu da aproksimiraju bilo koju kontinualnu funkciju do željenog nivoa tačnosti. U ovom radu je odlučeno da se kreira veštačka neuronska mreža koja će da bude u stanju da vrši preslikavanje skupa generisanih saobraćajnih situacija na skup optimalnih odluka. Skup generisanih saobraćajnih situacija se zajedno sa skupom optimalnih odluka koristi za treniranje veštačke neuronske mreže.

Trenirana neuronska mreža (slika 2) treba da bude u stanju da vrši rutiranje i raspodelu talasnih dužina u realnom vremenu.



Slika 2 -Neuronska mreža koja donosi u realnom vremenu odluku o prihvatanju/odbijanju zahteva

Drugim rečima, za svaki ispostavljeni zahtev za korišćenjem optičke mreže neuronska mreža donosi u realnom vremenu sledeće dve odluke: (a) odluku o prihvatanju ili odbijanju ispostavljenog zahteva; (b) odluku o ruti i talasnoj dužini u slučaju da je zahtev prihvaćen. Za testiranje kvaliteta odluka koje donosi neuronska mreža koriste se saobraćajni scenariji koji prethodno nisu korišćeni za treniranje mreže.

Algoritam za vršenje rutiranja i dodele talasnih dužina u realnom vremenu sastoji se iz sledećih algoritamskih koraka:

- Korak 1: Generisati skup saobraćajnih scenarija. Za svaki od generisanih scenarija primenom izabrane optimizacione ili heurističke tehnike izvršiti dodelu ruta i talasnih dužina tako da se maksimizira broj uspostavljenih konekcija.
- Korak 2: Kreirati i trenirati veštačku neuronsku mrežu koja vrsi preslikavanje skupa saobraćajnih scenarija na skup optimalnih odluka.
- Korak 3: Testirati neuronsku mrežu korišćenjem saobraćajnih scenarija koji prethodno nisu korišćeni za treniranje mreže.

#### 4. Zaključak

U radu je izložena osnovna ideja za razvoj inteligentnog sistema za vršenje rutiranja i dodelu talasnih dužina u realnom vremenu. Slični metodološki pristupi su korišćeni (Teodorović i ostali ((2001), (2006)), Teodorović i Lučić (2006)) za rešavanje različitih saobraćajnih problema (upravljanje radom izolovane signalisane raskrsnice u realnom vremenu, rutiranje flote saobraćajnih sredstava u uslovima neizvesne potražnje u čvorovima, upravljanje rezervacionim procesom i prodajom sedišta na letovima vazduhoplovnih kompanija, upravljanje radom parkinga) [15]-[17]. Modeli razvijani za rešavanje ovih problema su omogućili generisanje izuzetno kvalitetnih rešenja u realnom

vremenu. Svakako da su iskustva stečena prilikom rešavanja ovih problema izuzetno značajna. Stečena iskustva nam omogućavaju stvaranje veoma jakog uverenja da je moguće razviti inteligentni sistem za rutiranje i dodelu talasnih dužina u realnom vremenu sposoban do donosi odluke veoma visokog kvaliteta. U budućim istraživanjima razmatranog problema potrebno je razviti odgovarajuće računarske programe i izvršiti testiranja na većem broju različitih numeričkih primera.

#### Literatura:

- [1] A.E. Ozdaglar and D.P. Bersekas, "Routing and wavelength assignment in optical networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 11, No. 2, pp. 259–272, April 2003.
- [2] L. Li, A. K. Somani, "Dynamic wavelength routing using congestion and neighborhood information," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.7, no.5, pp. 779 – 786, Oct. 1999.
- [3] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "Dynamic lightpath establishment in wavelength-routed WDM networks," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 39, no. 9, pp. 100–108, Sept. 2001.
- [4] H. Zang, J. P. Jue, and B. Mukherjee, "A review of routing and wavelength assignment approaches for wavelength-routed optical WDM networks," *SPIE Optical Network Magazine*, vol. 1, pp. 47–60, Jan. 2000.
- [5] S. Xu, L. Li, S. Wang, C. Chen, "Wavelength assignment for dynamic traffic in WDM networks," *IEEE International Conference on Networks, 2000. (ICON 2000). Proceedings*, pp. 375 – 379, 2000.
- [6] Mewanou, S. Pierre, "Dynamic routing algorithms in all-optical networks," *IEEE CCECE 2003. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2003*. Vol. 2, pp. 773 – 776, May 2003.
- [7] X. Yang, B. Ramamurthy, "Dynamic routing in translucent WDM optical networks: the intradomain case," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 23, no. 3, pp. 955-971, Mar. 2005.
- [8] S. Xu, L. li, S. Wang, "Dynamic routing and assignment of wavelength algorithms in multifiber wavelength division multiplexing networks," *IEEE J. Sel. Areas Comm.*, vol. 18, no10, pp. 2130-2137, Oct. 2000.
- [9] J. Kuri *et. al.*, "Routing and wavelength assignment of scheduled lightpaths demand," *IEEE J. Sel. Areas Comm.*, vol. 21, no. 8, pp. 1231-1240, Oct. 2003.
- [10] P. Saengudomlert, E. H. Modiano, R. G. Gallager, "Dynamic wavelength assignment for WDM all-optical tree networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Volume 13, No.4, pp. 895 – 905, Aug. 2005.
- [11] P. Saengudomlert, E. Modiano, R. G. Gallager, "On-line routing and wavelength assignment for dynamic traffic in WDM ring and torus networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 14, no. 2, pp. 330 – 340, April 2006.
- [12] A. Alyatama, "Dynamic routing and wavelength assignment using learning automata technique [all optical networks]," *IEEE Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04*. Vol. 3, pp. 1912 – 1917, Nov/Dec. 2004.

- [13] R.M. Garlick and R.S. Barr, "Dynamic Wavelength Routing in WDM Networks via Ant Colony Optimization," in *Ant Algorithms*. Springer-Verlag Publishing, pp. 250-255, Sept. 2002
- [14] V. T. Le, X. Jiang, S. H. Ngo, S. Horiguchi, "Dynamic RWA Based on the Combination of Mobile Agents Technique and Genetic Algorithm in WDM Networks with Sparse Wavelength Conversion," *Proceed. of 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2005*, April 2005.
- [15] Teodorović, D., Lučić, P., Popović, J., Kikuchi, S., Stanic, B., "Intelligent Isolated Intersection", *Proceedings of the 10<sup>th</sup> IEEE International conference on Fuzzy Systems*, 276 –279, Melbourne, Australia, December 2-5, 2001.
- [16] Teodorović, D., Lučić, P., "Intelligent Parking Systems", *European Journal of Operational Research*, 175, 1666-1681, (2006).
- [17] Teodorović, D., Varadarajan, V., Popović, J., Chinnaswamy, M.R., Ramaraj, S., "Dynamic Programming - Neural Network Real - Time Traffic Adaptive Signal Control Algorithm", *Annals of Operations Research*, 143, 121-129, (2006).

**Abstract:** *In this paper, an "intelligent" routing and wavelength assignment control system was proposed. The proposed "intelligent" system makes the following "real time" decisions: (a) whether to accept or reject requested connection; (b) the decision about the route and wavelength assigned to the accepted request. The model proposed is based on the combination of the optimization/heuristic algorithms and artificial neural networks.*

**Keywords:** *Dynamic Routing and Wavelength Assignment, Metaheuristic Algorithms, Artificial Neural Networks*

## **DYNAMIC ROUTING AND WAVELENGTH ASSIGNMENT IN OPTICAL NETWORKS BASED ON THE LEARNING FROM EXAMPLES**

Dušan Teodorović, Jovan Popović, Katarina Vukadinović, Goran Marković